

«ХПИ». – 2009. – № 39. – С. 140-145. 4. *А.И. Мамаев* Сильноточковые процессы в растворах электролитов. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2005. 5. *С.-Т. Wu, F.-H. Lu* Synthesis of Barium Titanate Films by Plasma Electrolytic Oxidation at Room Electrolyte Temperature // Surf. and Coat. Technol. – 2005. – V. 199 (2-3). – P. 225-230.

Надійшла до редколегії 26.03.2010.

УДК 621.317.42

М.М.РЕЗИНКИНА, д-р техн. наук, зав. отделом, НТЦ МТО НАН
Украины, Харьков

Л.Э.ЛОБЖАНИДЗЕ, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИСТЕМ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Описано числовой розрахунок магнітного поля і магнітного моменту в околиці і всередині феромагнітних об'єктів за допомогою методу скінченних об'ємів. Змодельовані розподіли магнітного поля системи феромагнітних стрижнів, розташованих на різних відстанях один від одного. Розрахована залежність магнітного моменту від відстані між стрижнями.

The numeral calculation of magnetic field and magnetic moment in the vicinity and inside the ferromagnetic objects with the help of the method of final volumes has been described. Distribution of magnetic field of the system of ferromagnetic rods, located on different distances from each other has been modeled. Dependence of magnetic moment on distance between the rods has been computed.

Введение. При нахождении магнитного поля (МП) и магнитного момента (ММ) в окрестности сложных ферромагнитных конструкций аналитические оценки могут иметь значительную погрешность: в таких случаях эффективным представляется использование численных расчетов. Цель работы – описание методики численного расчета МП и ММ с помощью метода конечных объемов и поглощающих граничных условий и применение ее для расчета МП и ММ системы расположенных в виде прямоугольной рамки ферромагнитных стержней, а также определения зависимости ММ рассматриваемой системы от ее геометрической формы.

Аналитический расчет магнитного момента. Для равномерно намагниченных тел, таких как шар, эллипсоид, магнитный момент \vec{M} , намагниченность \vec{I} и напряженность поля внутри исследуемого тела \vec{H}_i имеют вид [1]:

$$\vec{M} = V \cdot \vec{I}, \quad \vec{I} = \frac{\kappa}{1 + \kappa N} \vec{H}_0, \quad \vec{H}_i = \frac{\vec{I}}{\kappa} = \frac{\vec{H}_0}{1 + \kappa N}, \quad (1)$$

где V – объем тела; κ – магнитная восприимчивость; $\kappa = \mu - 1$; μ – относительная магнитная проницаемость; N – коэффициент размагничивания, зависящий от геометрии исследуемого тела; \vec{H}_0 – напряженность внешнего магнитного поля.

Однако в большинстве случаев исследуемые объекты имеют сложную пространственную конфигурацию, что затрудняет использование аналитических методов. Подобные задачи целесообразно решать при помощи численных методов, например, метода конечных объемов [2-4].

Расчет постоянного магнитного поля с помощью метода конечных объемов и поглощающих граничных условий. Чтобы определить магнитное поле исследуемого объекта, на пространство в его окрестности накладывается расчетная сетка, узлы которой лежат на границах раздела сред. Электрические параметры среды внутри образованных сеткой ячеек считаются однородными. Метод конечных объемов [3, 4] предполагает интегрирование уравнений Максвелла по объемам полученных элементарных ячеек. Заменяя интегрирование дивергенции по объему интегрированием нормальной компоненты подинтегральной функции по поверхности ячейки, и выразив индукцию магнитного поля через напряженность, для каждого узла сетки получим:

$$\int_V \text{div} \vec{B} \cdot d\vec{v} = \oint_S \vec{B}_n \cdot d\vec{s} = \oint_S \mu_{i,j,k} \cdot \vec{H}_n \cdot d\vec{s} = 0, \quad (2)$$

где \vec{B} – индукция магнитного поля; $\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; \vec{H} – напряженность магнитного поля; S – поверхность параллелепипеда, грани которого делят пополам расстояния между соседними узлами; $\mu_{i,j,k}$ – относительная магнитная проницаемость (i, j, k) -й ячейки.

Подставив в (2) напряженность \vec{H} , выраженную через скалярный магнитный потенциал ϕ , и заменив производные их разностными аналогами, получим уравнение для решения поставленной задачи [2].

Использование конечно-разностных методов целесообразно при расчете магнитных полей в закрытых областях. Однако часто приходится иметь дело с открытыми областями, в связи с чем существенно увеличивается расчетная область и количество неизвестных рассматриваемой системы уравнений. Применение дополнительных «поглощающих граничных слоев» [5] позволяет решить эту проблему. Например, при помощи метода «односно хорошо согласованных слоев» границы расчетной области можно приблизить к объектам практически вплотную [5]. Данный подход предполагает введение на границах расчетной области дополнительных слоев. Распределение поля в них носит вспомогательный характер, и в результатах расчета не учитывается. Параметры данных слоев задаются анизотропными, что обеспечивает быстрое и безотражательное затухание в них электромагнитного поля [5].

При помощи данного метода было рассчитано МП вокруг (а) и внутри (б) системы ферромагнитных стержней, расположенных в виде рамки на различном расстоянии друг от друга во внешнем однородном МП, направленном вдоль оси ОУ. Длина стержней $L_y = 1$ м, сечение 0.04×0.04 м², $\mu = 200$.

Распределение МП системы стержней сравнивалось с распределением МП одиночного стержня в таком поле (рис. 1). Вид системы менялся в результате раздвигания параллельных приложенному полю стержней до расстояния, равного их длине (см. рис. 2, 3, где расстояние между стержнями 0.6 и 1 м соответственно).

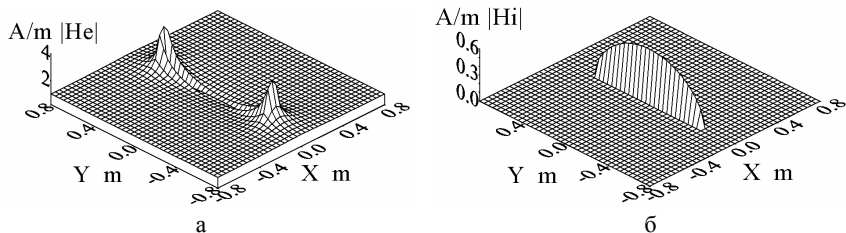


Рисунок 1

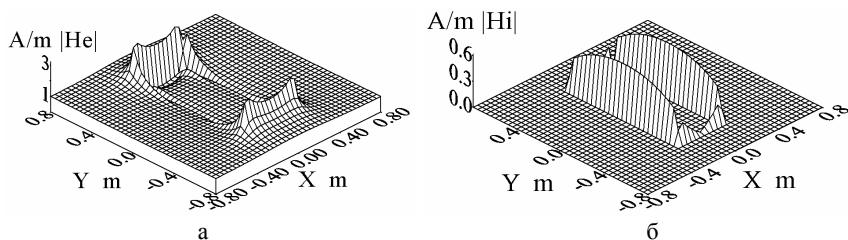


Рисунок 2

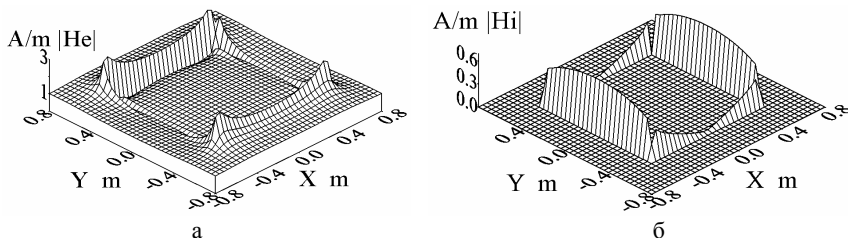


Рисунок 3

Величина относительного магнитного момента $M^* = M / M_{02}$ (где M_{02} – ММ двух сдвинутых стержней) системы ферромагнитных стержней для различного расстояния между ними представлена на рис. 4 (где d – расстояние между стержнями). Как следует из данной зависимости, увеличение расстоя-

ния между стержнями приводит к существенному повышению ММ системы. Так, ММ равносторонней рамки увеличивается на 84 % (рис. 3, 4) по сравнению со случаем двух сдвинутых вплотную стержней.

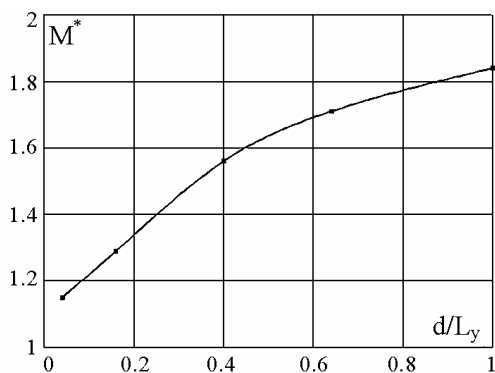


Рисунок 4

Закключение. Описан метод численного расчета магнитного момента и распределения магнитного поля в окрестности и внутри конструкций, состоящих из ферромагнитных стержней, основанный на использовании метода конечных объемов и введении поглощающих граничных слоев.

Выполнены примеры расчета магнитных моментов и магнитного поля системы ферромагнитных стержней, имитирующих ферромагнитные элементы, например систем пассивного демпфирования космических аппаратов. Рассчитана зависимость магнитного момента от расстояния между стержнями. Полученные количественные показатели влияния взаимного расположения ферромагнитных стержней могут служить основанием при выборе параметров ферромагнитных конструкций со сниженным магнитным полем.

Список литературы: 1. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – М.-Л: изд-во Главсевморпути, 1941. – 283 с. 2. Резинкина М.М. Численный расчет магнитного поля и магнитного момента ферромагнитных тел сложной пространственной конфигурации // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, № 8. – С. 8-17. 3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с. 4. Щерба А.А., Резинкина М.М. Моделирование и анализ электрических полей энергетических объектов. – Киев: Наукова думка, 2008. – 248 с. 5. Taflov A., Hagness S. Computational electrodynamics: the finite difference time domain method. – Boston – London: Artech House, 2000. – 852 p.

Поступила в редакцию 29.03.2010